

COORDENAÇÃO E APLICAÇÃO DO ELEMENTO DE SOBRECORRENTE DE SEQUÊNCIA-NEGATIVA NA PROTEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO

por

**EDMUND O. SCHWEITZER, III
JOHN J. KUMM**

**SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC.
PULLMAN, WASHINGTON**

**APRESENTADO NA
ELECTRIC COUNCIL OF NEW ENGLAND
PROTECTIVE RELAYING COMMITTEE MEETING Nº 72
BURLINGTON, VERMONT
18-19 DE SETEMBRO, 1997**

COORDENAÇÃO E APLICAÇÃO DO ELEMENTO DE SOBRECORRENTE DE SEQUÊNCIA-NEGATIVA NA PROTEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO

A. F. Elnewehi
Member, IEEE

British Columbia Hydro
Vancouver, British Columbia
Canadá

Edmund O. Schweitzer, III
Fellow, IEEE

Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
Pullman, Washington
USA

M. W. Feltis
Member, IEEE

PALAVRAS-CHAVE

Elementos de sobrecorrente de sequência-negativa, Proteção da distribuição, Coordenação dos dispositivos de proteção, Condutor de fase aberta

RESUMO

Os elementos de sobrecorrente de sequência-negativa não respondem à carga equilibrada e podem, portanto, ser ajustados para operar mais rápido e com maior sensibilidade do que os elementos de sobrecorrente de fase para faltas entre fases. Este *paper* demonstra que num sistema radial da distribuição, os elementos de sobrecorrente de sequência-negativa precisam somente ser coordenados com os dispositivos de sobrecorrente de fase primários localizados à frente ("downstream") para faltas entre fases. A coordenação para os outros tipos de falta é, conseqüentemente, obtida sem ser necessário efetuar uma outra análise. Os efeitos da corrente de carga de sequência-negativa e dos condutores de fase aberta sobre os elementos de sobrecorrente de sequência-negativa são também abordados.

INTRODUÇÃO

Devido ao fato de os elementos de sobrecorrente de sequência-negativa não responderem à carga equilibrada, eles podem ser ajustados para operar mais rápido e com maior sensibilidade do que os elementos de sobrecorrente de fase para faltas fase-fase nos sistemas da distribuição. Assim como ocorre com os elementos de sobrecorrente de terra, os elementos de sobrecorrente de sequência-negativa podem ser ajustados abaixo dos níveis de carga. Por outro lado, os elementos de sobrecorrente de fase têm de ser ajustados acima dos níveis máximos de carga.

Os elementos de sobrecorrente de sequência-negativa com características de tempo-inverso padrão são, atualmente, disponibilizados nos relés microprocessados de proteção da distribuição como parte do complemento de elementos e funções fornecidas [Referência 1]. Esses elementos, fornecidos virtualmente sem nenhum custo adicional, podem melhorar a proteção contra faltas entre fases, exigindo, para isso, um mínimo de esforço para coordenação.

92 SM 372-3 PWRD Um *paper* recomendado e aprovado pelo IEEE Power System Relaying Committee da IEEE Power Engineering Society para apresentação no IEEE/PES 1992 Summer Meeting, Seattle, WA, 12-16 de julho, 1992. O manuscrito foi submetido em 6 de janeiro de 1992 e foi disponibilizado para impressão em 16 de abril de 1992.

ANÁLISE DAS FALTAS

I_2 = corrente de sequência-negativa da falta

I_p = corrente de fase da falta

As análises das faltas mostradas a seguir são baseadas nos elementos de sobrecorrente de sequência-negativa que operam com base na magnitude da corrente de sequência-negativa $3I_2$. Os princípios de coordenação discutidos também se aplicam aos elementos que respondem à I_2 , efetuando o ajuste apropriado do fator de coordenação. As análises mostram que os elementos de sobrecorrente de sequência-negativa somente precisam ser coordenados com os dispositivos de sobrecorrente de fase primários localizados à frente para faltas entre fases. A coordenação para outros tipos de falta é, conseqüentemente, obtida. Todas as análises deste *paper* estão restritas somente aos sistemas radiais da distribuição.

Faltas num Sistema Radial da Distribuição

O Apêndice I compara a relação $|3I_2/I_p|$ para faltas AG (A-Terra), BC e BCG (BC-Terra) [equações (I-1), (I-2) e (I-4)]. Os resultados estão relacionados na Tabela I, mostrada abaixo:

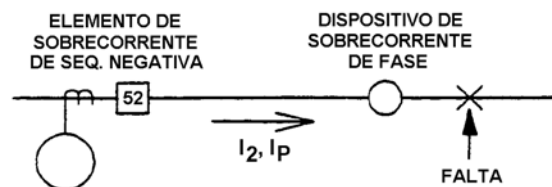


Figura 1: Falta em um Sistema Radial da Distribuição

Tabela I: Faltas em um Sistema Radial da Distribuição

Falta	$ 3I_2/I_p $
AG	1
BC	$\sqrt{3}$
BCG	$\leq \sqrt{3}$

Faltas no Secundário de um Transformador Delta-Estrela

Faltas fase-terra e fase-fase no secundário conectado em estrela de um transformador delta-estrela geram correntes de sequência-negativa no sistema primário [Referência 2]. O Apêndice II compara a relação $|3I_2/I_p|$ no primário para faltas ag (a-terra) e bc no secundário [equações (II-1) e (II-2)]. Os resultados estão relacionados na Tabela II.

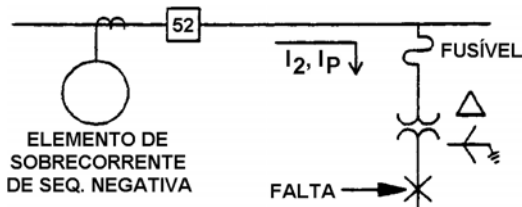


Figura 2: Falhas no Secundário de um Transformador Delta-Estrela

Tabela II: Falhas no Secundário de um Transformador Delta-Estrela

Falha	$ 3I_2/I_P $
ag	$\sqrt{3}$
bc	1,5

Sumário das Falhas

Das Tabelas I e II, a relação $|3I_2/I_P|$ mais alta é:

$$|3I_2/I_P| = \sqrt{3} \quad (1)$$

Portanto, um elemento de sobrecorrente de sequência negativa operando com base na corrente $3I_2$, com o valor de pickup ajustado em $\sqrt{3}$ vezes o valor de pickup de um dispositivo de sobrecorrente de fase, tem a mesma sensibilidade para falhas primárias fase-fase, e menos ou igual sensibilidade para outros tipos de falha, quando comparado ao mesmo dispositivo de sobrecorrente de fase. Os procedimentos mostrados a seguir devem ser aplicados para ajustar o elemento de sobrecorrente de sequência negativa.

PROCEDIMENTOS PARA COORDENAÇÃO DOS ELEMENTOS DE SOBRECORRENTE DE SEQUÊNCIA-NEGATIVA COM ELEMENTOS DE SOBRECORRENTE DE FASE

1. Inicie com o elemento de sobrecorrente de sequência negativa do dispositivo primário localizado à frente ("downstream") que está mais distante (ex., relé de um alimentador da distribuição em uma subestação).
2. Identifique o dispositivo de sobrecorrente de fase (ex., religador de linha, fusível) localizado à frente do elemento de sobrecorrente de sequência negativa que constitui a principal preocupação para a coordenação. Em geral, este é o caso do dispositivo de sobrecorrente de fase que tem o maior tempo de eliminação da falha.
3. Considere o elemento de sobrecorrente de sequência negativa como um elemento de sobrecorrente de fase "equivalente". Obtenha o valor de pickup, dial de tempo (alavanca), tipo da curva ou ajustes das temporizações para que esse elemento "equivalente" seja coordenado com o dispositivo de sobrecorrente de fase localizado à frente da mesma forma que qualquer coordenação de fase seria efetuada. As considerações referentes à carga podem não ser levadas em conta quando da derivação dos ajustes do elemento de sobrecorrente de fase "equivalente".

4. Multiplique o ajuste do valor de pickup do elemento de sobrecorrente de fase "equivalente" por $\sqrt{3}$ para converter o mesmo no ajuste do valor de pickup do elemento de sobrecorrente de sequência negativa em termos da corrente $3I_2$.

$$\text{pickup do elemento de sobrecorrente de sequência negativa} = \sqrt{3} \quad (\text{pickup do elemento de sobrecorrente de fase "equivalente"}) \quad (2)$$

Qualquer dial de tempo (alavanca), tipo da curva ou ajustes de temporização calculados para o elemento de sobrecorrente de fase "equivalente" é também usado para o elemento de sobrecorrente de sequência negativa sem nenhum fator de conversão aplicado.

5. Ajuste o elemento de sobrecorrente de sequência negativa localizado atrás ("upstream") mais próximo para coordenar com o primeiro elemento de sobrecorrente de sequência negativa primário localizado à frente ("downstream"), e assim por diante. Novamente, a coordenação não é influenciada pelas considerações das cargas.

EXEMPLO DA COORDENAÇÃO DE UM ELEMENTO DE SOBRECORRENTE DE SEQUÊNCIA-NEGATIVA COM UM ELEMENTO DE SOBRECORRENTE DE FASE

Na Figura 3, os elementos de sobrecorrente de fase e de sequência negativa do relé do alimentador (51F e 51QF, respectivamente) devem ser coordenados com o elemento de sobrecorrente de fase do religador da linha (51R).

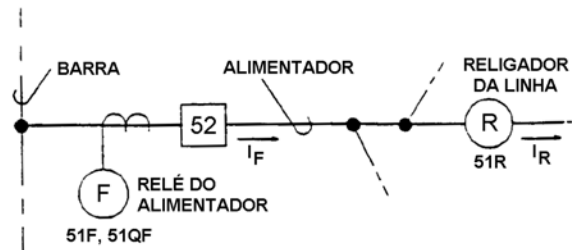


Figura 3: Dispositivos de Proteção do Alimentador da Distribuição

- I_F = Corrente de carga máxima através do relé do alimentador = 450 A
- I_R = Corrente de carga máxima através do religador da linha = 150 A
- 51F = Elemento de sobrecorrente temporizado de fase do relé do alimentador
- 51QF = Elemento de sobrecorrente temporizado de sequência negativa do relé do alimentador
- 51R = Elemento de sobrecorrente temporizado de fase do religador da linha ("curva lenta" de fase)

Coordenação de Fases Tradicional

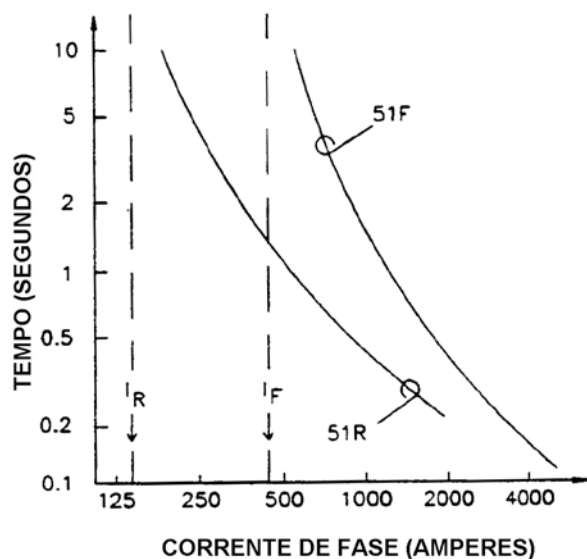


Figura 4: Coordenação de Fases Tradicional

51F: pickup = 600 A (acima da carga máxima do alimentador, I_F)

51R: pickup = 200 A (acima da carga máxima do religador da linha, I_R)

A Figura 4 mostra a coordenação tradicional dos elementos de sobrecorrente de fase entre os elementos de sobrecorrente de fase do relé do alimentador e do religador da linha. Os elementos de sobrecorrente de fase têm de acomodar a corrente de carga e a corrente de partida de cargas a frio ("cold load pickup"). A corrente de carga máxima do alimentador de 450 A limita a sensibilidade do elemento de sobrecorrente de fase do alimentador, 51F, a um valor de pickup de 600 A. O relé do alimentador não pode efetuar o backup do religador de linha para faltas entre fases menores do que 600 A.

Aplique o Elemento de Sobrecorrente de Sequência-Negativa no Relé do Alimentador (Procedimentos 1 a 3)

A aplicação dos procedimentos 1 a 3 para coordenação do elemento de sobrecorrente de sequência-negativa resulta no elemento de sobrecorrente de fase "equivalente" (51EP) do relé do alimentador da Figura 5. A curva para 51F está mostrada somente para comparação.

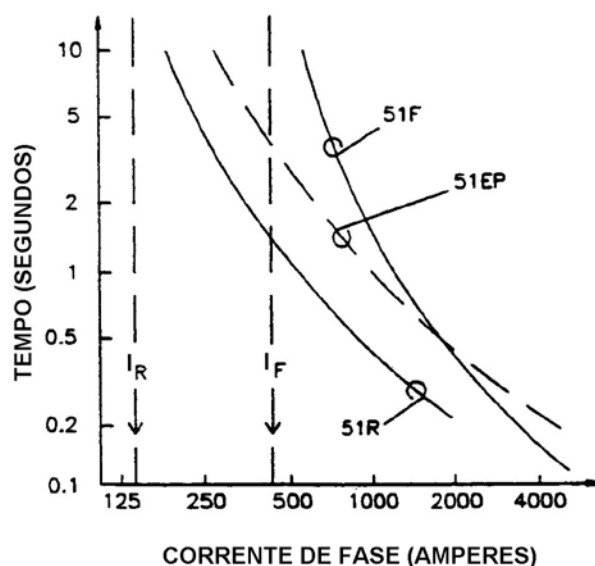


Figura 5: Coordenação de Faltas Entre Fases

51EP: pickup = 300 A (abaixo da carga máxima do alimentador, I_F)

Uma melhoria considerável na sensibilidade e na velocidade de operação para faltas entre fases é obtida com o elemento 51EP. O valor de pickup de 300 A do elemento 51EP tem duas vezes a sensibilidade do valor de pickup de 600 A do elemento 51F. A velocidade de operação do elemento 51EP para faltas entre fases com valores abaixo de 2.000 A é mais rápida do que a do elemento 51F.

Converta os Ajustes do Elemento de Sobrecorrente de Fase "Equivalente" para Ajustes do Elemento de Sobrecorrente de Sequência-Negativa (Procedimento 4)

O elemento de sobrecorrente de fase "equivalente" (elemento 51EP na Figura 5) converte para ajustes verdadeiros do elemento de sobrecorrente de sequência-negativa (51QN na Figura 6) através da aplicação da equação (2). O dial de tempo (alavanca) e o tipo da curva do elemento permanecem os mesmos.

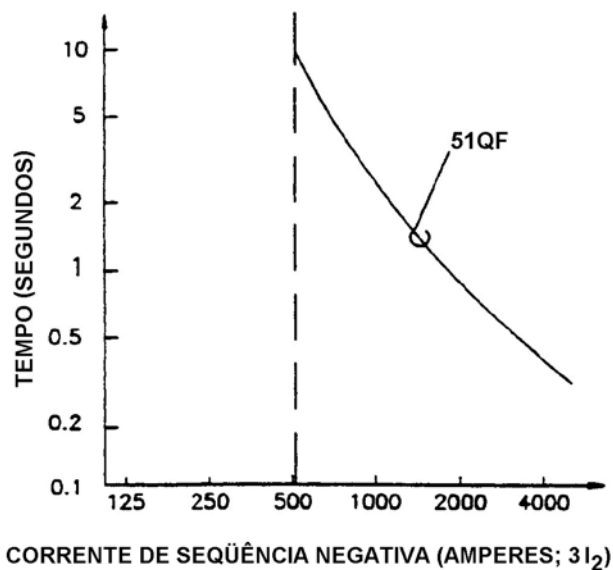


Figura 6 Elemento de Sobrecorrente de Sequência-Negativa Derivado do Elemento de Sobrecorrente de Fase “Equivalente”, 51EP

$$51QF: \text{pickup} = \sqrt{3} (300 \text{ A}) = 520 \text{ A}$$

Após ter efetuado a coordenação entre o elemento de sobrecorrente de sequência-negativa do relé do alimentador (51QF) e o elemento de sobrecorrente de fase do religador da linha localizado à frente (51R) para faltas entre fases, a coordenação entre os dois dispositivos para outros tipos de falta é também obtida.

Elemento de Sobrecorrente de Sequência-Negativa Aplicado em uma Barra da Distribuição (Procedimento 5)

O exemplo anterior foi para um alimentador da distribuição. Um elemento de sobrecorrente de sequência-negativa protegendo uma barra da distribuição propicia uma melhoria até maior na sensibilidade para faltas entre fases.

O valor de pickup do elemento de sobrecorrente de fase da barra da distribuição tem de ser ajustado acima da carga combinada de todos os alimentadores da barra, mais quaisquer condições de carregamento de emergência. O valor de pickup do elemento de sobrecorrente de fase da barra é frequentemente ajustado pelo menos quatro vezes maior do que o pickup do elemento de sobrecorrente de fase do alimentador cuja proteção de backup é efetuada por ele. Dessa forma, a sensibilidade para faltas entre fases tanto na barra quanto no alimentador é enormemente reduzida. A proteção de backup do relé do alimentador pelo relé da barra é limitada.

Os elementos de sobrecorrente de sequência-negativa da barra da distribuição podem ser ajustados com valores significativamente abaixo dos níveis de carga da barra de distribuição e proporcionar uma sensibilidade bem maior para faltas entre fases. Eles são coordenados com os

elementos de sobrecorrente de sequência-negativa ou de fase dos alimentadores da distribuição, e propiciam uma proteção de backup mais sensível e mais rápida para faltas entre fases.

OUTRAS SITUAÇÕES POSSÍVEIS E IMPORTANTES RELACIONADAS À APLICAÇÃO DOS ELEMENTOS DE SOBRECORRENTE DE SEQUÊNCIA-NEGATIVA

Coordenação de Terra

Se o dispositivo de proteção primário (“downstream”) incluir elementos de sobrecorrente de terra, além dos elementos de sobrecorrente de fase, não haverá necessidade de se verificar a coordenação entre os elementos de sobrecorrente de terra e os elementos de sobrecorrente de sequência-negativa localizados atrás (“upstream”). O elemento de sobrecorrente de fase localizado à frente, quer ele opere mais rápido ou mais lento do que seu elemento de sobrecorrente de terra complementar, vai operar mais rápido do que o elemento de sobrecorrente de sequência-negativa localizado atrás para todas as faltas, inclusive aquelas que envolvem a terra.

Corrente de Carga de Sequência-Negativa

Uma falta desequilibrada no alimentador gera tensão de sequência-negativa na barra da distribuição, a qual, por sua vez, gera corrente de carga de sequência-negativa nos alimentadores conectados à barra que não estão sob defeito. O efeito da corrente de carga de sequência-negativa dos alimentadores sem defeito é o de reduzir a corrente de sequência-negativa para o relé da barra [Referência 3]. Isso dessensibiliza os elementos de sobrecorrente de sequência-negativa do relé da barra e ajuda na coordenação desses elementos com os elementos de sobrecorrente do relé do alimentador localizado à frente.

A Figura 7 e a Tabela III mostram como ocorre essa dessensibilização dos elementos de sobrecorrente de sequência-negativa do relé da barra. A Tabela III mostra a relação $|I_{2B}/I_2|$ para diversas relações da impedância da carga/fonte ($|Z_{2L}/Z_{2S}|$) referentes a uma subestação da distribuição usada como exemplo. À medida que Z_{2S} diminui (fonte mais forte) ou Z_{2L} aumenta (carga mais baixa), o efeito da dessensibilização nos elementos de sobrecorrente de sequência-negativa do relé da barra é reduzido ($|I_{2B}/I_2|$ se aproxima de um).

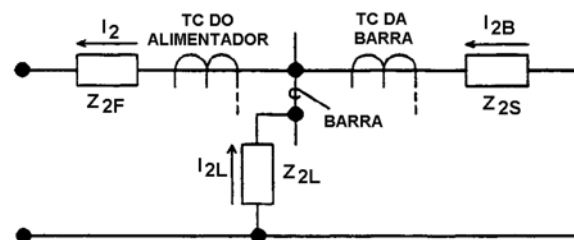


Figura 7 Diagrama de Sequência-Negativa para Faltas Desequilibradas no Alimentador da Distribuição

- Z_{2S} = impedância de seqüência-negativa da fonte
- Z_{2F} = impedância de seqüência-negativa do alimentador para a falta
- Z_{2L} = impedância de seqüência-negativa efetiva da carga combinada dos alimentadores sem defeito
- I_{2B} = magnitude da corrente de seqüência-negativa para o relé da barra
- I_2 = magnitude da corrente de seqüência-negativa para o relé do alimentador
- I_{2L} = magnitude da corrente de carga de seqüência-negativa dos alimentadores sem defeito
- $I_{2B}/I_2 = Z_{2L}/(Z_{2L} + Z_{2S})$

Tabela III: Dessensibilização do Elemento de Seqüência-Negativa do Relé da Barra para Diversas Relações das Impedâncias Carga/Fonte

$ Z_{2L}/Z_{2S} $	3	4	5	6	8	12
$ I_{2B}/I_2 $ para:						
$\angle Z_{2S} = 80^\circ$.83	.87	.90	.91	.94	.96
$\angle Z_{2S} = 85^\circ$.85	.89	.91	.93	.94	.96

$\angle Z_{2L} (= 20^\circ)$ é constante para todos os casos.

Normalmente, os valores menores das relações $|Z_{2L}/Z_{2S}|$ da Tabela III são válidos somente para condições de pico de carga (Z_{2L} pequeno). Na maioria das vezes, os níveis de carga são muito menores e os valores maiores das relações da Tabela III são os aplicados.

Condutor de Fase Aberta

As análises seguintes para condições de condutor de fase aberta assumem um condutor de fase aberta próximo à localização do elemento de sobrecorrente de seqüência-negativa (ex., fase aberta no ponto de saída do alimentador da distribuição da subestação, logo à frente do relé do alimentador). As condições de fase aberta em pontos mais remotos do sistema de distribuição (ex., operação do fusível da derivação) geralmente causam menos desbalanço.

A análise do condutor de fase aberta considera que nenhum condutor da fase está em contato com a terra ou outros condutores de fase.

O objetivo da análise é mostrar os níveis da corrente de seqüência-negativa gerada pelas condições descritas do condutor de fase aberta e como os ajustes do elemento de

sobrecorrente de seqüência-negativa se relacionam a esses níveis de corrente.

Sistema da Distribuição a Quatro Fios:

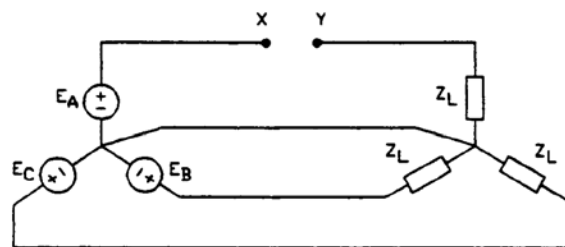


Figura 8 Condutor de Fase Aberta em um Sistema da Distribuição a Quatro Fios

Z_L = impedância de carga do alimentador

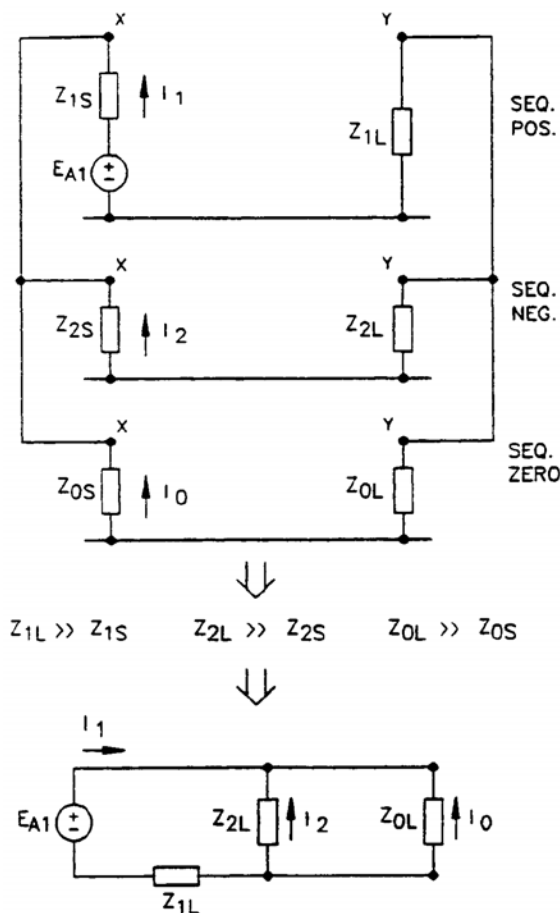


Figura 9 Diagrama de Seqüência para um Condutor de Fase Aberta em um Sistema da Distribuição a Quatro Fios

Z_{1L} = impedância de carga de seqüência-positiva do alimentador

Z_{2L} = impedância de carga de seqüência-negativa do alimentador

Z_{0L} = impedância de carga de seqüência-zero do alimentador

Z_{1S} = impedância de seqüência-positiva da fonte

Z_{2S} = impedância de seqüência-negativa da fonte

Z_{0S} = impedância de seqüência-zero da fonte

I_1 = corrente de seqüência-positiva

I_2 = corrente de seqüência-negativa

I_0 = corrente de seqüência-zero

A partir do diagrama reduzido da Figura 9:

$$I_1 = E_{A1} / \{ Z_{1L} + [Z_{2L}Z_{0L} / (Z_{2L} + Z_{0L})] \}$$

$$= E_{A1}(Z_{2L} + Z_{0L}) / [Z_{1L}(Z_{2L} + Z_{0L}) + Z_{2L}Z_{0L}] \quad (4)$$

$$-I_2 = I_1 Z_{0L} / (Z_{2L} + Z_{0L})$$

$$= E_{A1} Z_{0L} / [Z_{1L}(Z_{2L} + Z_{0L}) + Z_{2L}Z_{0L}] \quad (5)$$

Antes da abertura do condutor da fase "A", a equação seguinte permanecia verdadeira para o sistema equilibrado a quatro fios:

$$I_L = E_{A1} / Z_{1L} = \text{corrente de carga} \quad (6)$$

Combinando a equação (6) com a equação (5), temos:

$$-I_2 = I_L Z_{1L} Z_{0L} / [Z_{1L}(Z_{2L} + Z_{0L}) + Z_{2L}Z_{0L}] \quad (7)$$

$$|3I_2| = |3I_L Z_{1L} Z_{0L} / [Z_{1L}(Z_{2L} + Z_{0L}) + Z_{2L}Z_{0L}]| \quad (8)$$

Para os propósitos do exemplo, vamos considerar $Z_{1L} = Z_{2L} = Z_{0L}$

então,

$$|3I_2| = |I_L| \quad (9)$$

A equação (9) indica que o elemento de sobrecorrente de seqüência-negativa (operando com base em $3I_2$) detecta a corrente de seqüência-negativa gerada pela condição do condutor de fase aberta se a magnitude do seu valor de pickup estiver ajustada igual a I_L (I_L varia continuamente entre os níveis mínimo e máximo da corrente de carga). Expressando novamente essa relação em termos do valor de pickup do elemento de sobrecorrente de fase "equivalente" [ver equação (2)]:

$$\text{pickup do elemento de fase "equivalente"} = |I_L / \sqrt{3}| = 0,577I_L \quad (10)$$

Sistema da Distribuição a Três Fios:

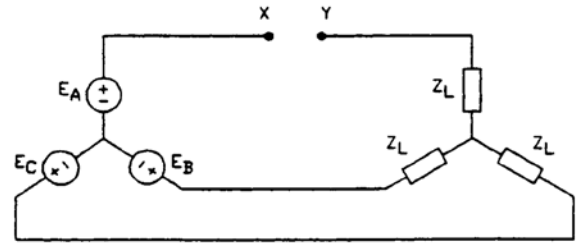


Figura 10 Condutor de Fase Aberta em um Sistema da Distribuição a Três Fios

Z_L = impedância de carga do alimentador

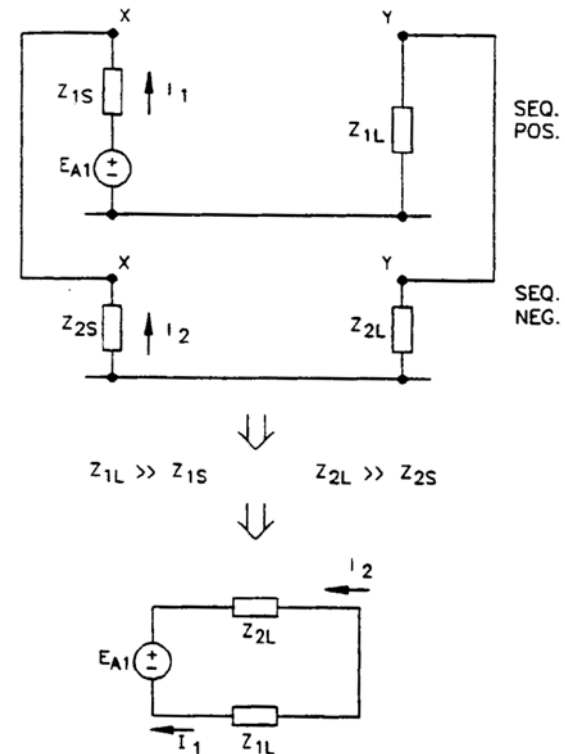


Figura 11 Diagrama de Seqüência para um Condutor de Fase Aberta em um Sistema da Distribuição a Três Fios

Z_{1L} = impedância de carga de seqüência-positiva do alimentador

Z_{2L} = impedância de carga de seqüência-negativa do alimentador

Z_{1S} = impedância de seqüência-positiva da fonte

Z_{2S} = impedância de seqüência-negativa da fonte

I_1 = corrente de seqüência-positiva

I_2 = corrente de seqüência-negativa

A partir do diagrama de seqüência reduzido da Figura 11:

$$I_1 = -I_2 = E_{A1}/(Z_{1L} + Z_{2L}) \quad (11)$$

Antes da abertura do condutor da fase “A”, a equação seguinte permanecia verdadeira para o sistema equilibrado a três fios:

$$I_L = E_{A1}/Z_{1L} = \text{corrente de carga} \quad (12)$$

Combinando a equação (12) com a equação (11), temos:

$$-I_2 = I_L Z_{1L}/(Z_{1L} + Z_{2L}) \quad (13)$$

$$|3I_2| = |3I_L Z_{1L}/(Z_{1L} + Z_{2L})| \quad (14)$$

Para os propósitos do exemplo, vamos considerar $Z_{1L} = Z_{2L}$

então,

$$|3I_2| = |3I_L/2| = |1,5I_L| \quad (15)$$

A equação (15) indica que o elemento de sobrecorrente de seqüência-negativa (operando com base em $3I_2$) detecta a corrente de seqüência-negativa gerada pela condição do condutor de fase aberta se a magnitude do seu valor de pickup estiver ajustada igual a $1,5I_L$ (I_L varia continuamente entre os níveis mínimo e máximo da corrente de carga). Expressando novamente essa relação em termos do valor de pickup do elemento de sobrecorrente de fase “equivalente” [ver equação (2)]:

$$\text{pickup do elemento de fase “equivalente”} = |1,5I_L/\sqrt{3}| = 0,866I_L \quad (16)$$

CONCLUSÕES

Os elementos de sobrecorrente de seqüência-negativa são, atualmente, disponibilizados nos relés microprocessados da distribuição. Esses elementos podem ser ajustados abaixo dos níveis de carga para operar mais rápido e com maior

sensibilidade do que os elementos de sobrecorrente de fase para faltas entre fases no sistema da distribuição.

Um possível impedimento para esta aplicação é a falta de diretrizes sobre como coordenar os elementos de sobrecorrente de seqüência-negativa com outros dispositivos de proteção do sistema da distribuição que operam com base em grandezas elétricas diferentes (isto é, correntes de fase e de seqüência-zero).

Este *paper* apresentou procedimentos simples de ajustes para coordenar os elementos de sobrecorrente de seqüência-negativa com elementos de sobrecorrente de fase primários localizados à frente (“downstream”) num sistema radial da distribuição. A coordenação para outras faltas e com elementos de sobrecorrente de terra é, conseqüentemente, obtida, sem necessidade de se efetuar outras análises.

O efeito da corrente de carga de seqüência-negativa é mínimo, conforme foi mostrado, e, na verdade, ajuda na coordenação dos elementos de sobrecorrente de seqüência-negativa com os dispositivos localizados à frente.

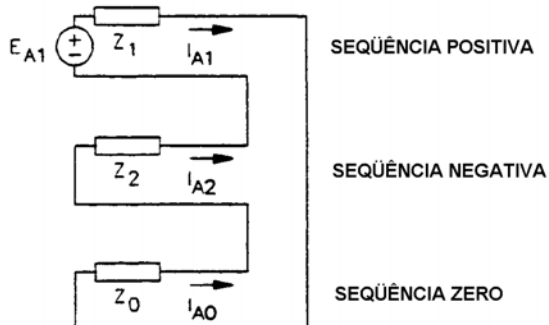
As condições do condutor de fase aberta (condutor de fase não tendo contato com a terra ou com outros condutores de fase) foram analisadas. As correlações entre a corrente de carga e corrente de seqüência-negativa gerada por essas condições de desbalanço foram estabelecidas.

APÊNDICE I

FALTAS NUM SISTEMA RADIAL DA DISTRIBUIÇÃO

Veja a Figura 1.

Falta Fase-Terra (AG)



$$\begin{matrix} I_{A1} \\ I_{A2} \\ I_{A0} \end{matrix} \quad I_{A1} = I_{A2} = I_{A0}$$

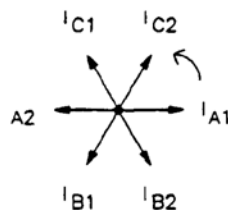
$$\begin{matrix} I_{B2} \cdot I_{C1} \\ I_{A1} \cdot I_{B0} \\ I_{B1} \cdot I_{C2} \end{matrix} \quad \begin{matrix} I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} \\ I_B = I_{B1} + I_{B2} + I_{B0} \\ I_C = I_{C1} + I_{C2} + I_{C0} \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} I_A \\ 3 I_2 \\ \frac{3 I_2}{I_P} \end{matrix} \quad \begin{matrix} 3 I_{A2} = I_A \\ |3 I_2| = |I_P| \\ \left| \frac{3 I_2}{I_P} \right| = 1 \quad (I-1) \end{matrix}$$

Falta Fase-Fase (BC)



$$I_{A2} = -I_{A1}$$

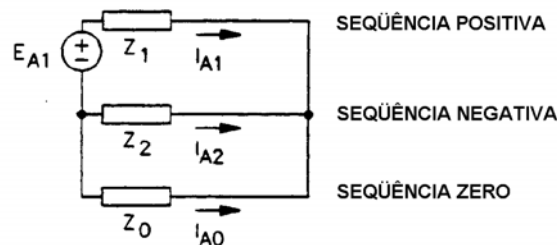


$$\begin{matrix} I_A = I_{A1} + I_{A2} \\ = 0 \\ I_B = I_{B1} + I_{B2} \\ I_C = I_{C1} + I_{C2} \end{matrix}$$



$$\begin{matrix} |\sqrt{3} I_{B2}| = |I_B| \\ |\sqrt{3} I_{C2}| = |I_C| \\ |\sqrt{3} I_2| = |I_P| \\ |3 I_2| = |\sqrt{3} I_P| \\ \left| \frac{3 I_2}{I_P} \right| = \sqrt{3} \quad (I-2) \end{matrix}$$

Falta Fase-Fase-Terra (BCG)



$$I_{A2} = -I_{A1} \frac{Z_0}{Z_0 + Z_2}$$

$$I_{A0} = -I_{A1} \frac{Z_2}{Z_0 + Z_2}$$

$$I_B = \alpha^2 I_{A1} + \alpha I_{A2} + I_{A0}$$

$$\alpha = 1 \angle 120^\circ$$

A PARTIR DAS EQUAÇÕES ACIMA, A SEGUINTE EQUAÇÃO PODE SER DERIVADA:

$$\left| \frac{3 I_2}{I_P} \right| = \left| \sqrt{\frac{3}{1 + \frac{Z_2}{Z_0} + \left(\frac{Z_2}{Z_0} \right)^2}} \right| \quad (I-3)$$

Z0 INCLUI A RESISTÊNCIA DE FALTA À TERRA, SE EXISTENTE

$$\left| \frac{Z_0}{Z_2} \right| = 0.00 \quad \left| \frac{3 I_2}{I_P} \right| = 0.00 \quad \left| \frac{3 I_2}{3 I_0} \right| = 0.00$$

↓ ↓ ↓

∞ $\sqrt{3}$ ∞ (I-4)

$\left| \frac{Z_0}{Z_2} \right| \Rightarrow \infty$ (CONFORME A RESISTÊNCIA DE FALTA À TERRA AUMENTA)

APÊNDICE II

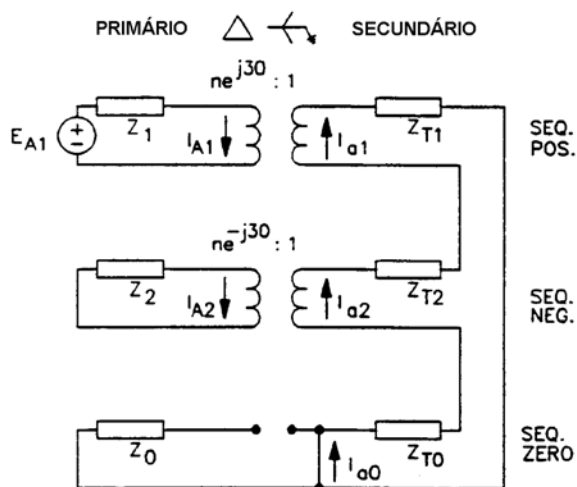
FALTAS NO SECUNDÁRIO DE UM TRANSFORMADOR DELTA-ESTRELA

Veja a Figura 2.

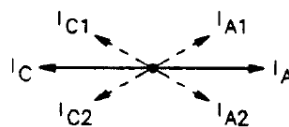
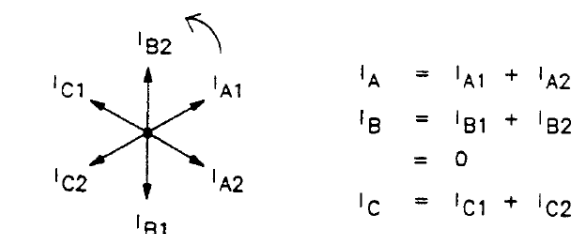
$$n = (V_{L-N \text{ prim.}})/(V_{L-N \text{ sec.}})$$

Z_T = impedância do transformador

Falta Fase-Terra (ag)

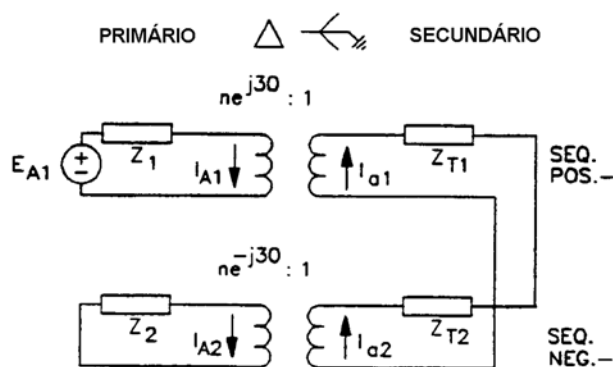


$|I_{A1}| = |I_{A2}|$ $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$

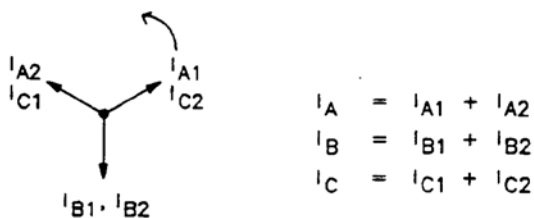


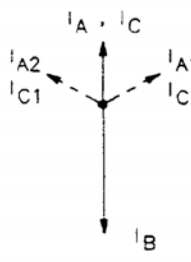
$$\begin{aligned} \sqrt{3} |I_{A2}| &= |I_A| \\ \sqrt{3} |I_{C2}| &= |I_C| \\ \sqrt{3} |I_2| &= |I_P| \\ \left| \frac{3 I_2}{I_P} \right| &= \sqrt{3} \text{ (II-1)} \end{aligned}$$

Falta Fase-Fase (bc)



$|I_{A1}| = |I_{A2}|$ $I_{a2} = -I_{a1}$

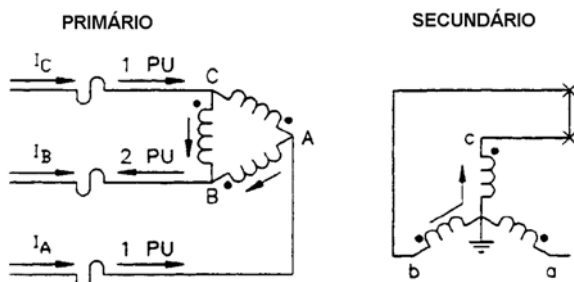




$$\begin{aligned}
 |I_{A2}| &= |I_A| \\
 |I_{C2}| &= |I_C| \\
 2 |I_{B2}| &= |I_B| \\
 |3 I_2| &= |3 I_A| = |3 I_C| \\
 &= |1.5 I_B| \\
 |3 I_2| &= |1.5 I_{P(MAX)}| \\
 \frac{|3 I_2|}{I_{P(MAX)}} &= 1.5 \quad (II-2)
 \end{aligned}$$

Estudos adicionais mostram que a fase B primária tem duas vezes a magnitude da corrente de falta quando comparada à fase A ou C primária para uma falta fase-fase (bc) no secundário de um transformador delta-estrela:

$$|2I_A| = |I_B| = |2I_C| \quad (II-3)$$



Após a queima do fusível da fase B, nenhuma corrente de falta circula nas fases primárias A e C. Logo, a coordenação com $I_{P(MAX)}$ é apropriada (equação II-2).

REFERÊNCIAS

1. A. F. Elnewehi, E. O. Schweitzer, III e M. W. Feltis, "Improved Sensitivity and Security for Distribution Bus and Feeder Relays". Proceedings of the 18th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, 22-24 de outubro de 1991. Washington State University, Conferences and Institutes, Pullman, Washington.
2. ANSI/IEEE C37.91-1985, IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers, section 5.6.2 Negative Sequence Relays.
3. J. M. Crockett e W. A. Elmore, "Performance of Phase-to-Phase Distance Units". Proceedings of the 13th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, 21-23 de outubro de 1986, pp. 22-23, Areas of Concern about Load Effects on Phase-to-Phase Units. Washington State University, Conferences and Institutes, Pullman, Washington.

BIOGRAFIAS



Ahmed F. Einwehi (M '92) é um engenheiro sênior de proteção de sistemas no Departamento de Planejamento de Proteção da *British Columbia Hydro and Power Authority* (B. C. Hydro), Vancouver, British Columbia, Canadá. Ele graduou-se em 1964 na Faculty of Engineering, Cairo University, Cairo, Egito, com um B.Sc em *Electrical Power Engineering*. De 1964 a 1971, trabalhou para a Aswan Dam Authority, no Egito.

Ele emigrou para o Canadá e juntou-se a B. C. Hydro em 1971. Trabalhou em posições anteriores como engenheiro de proteção de campo e engenheiro de planejamento na B. C. Hydro. Ele é um engenheiro profissional registrado na província de British Columbia e faz parte de dois grupos—*IEEE PES Power System Relaying Committee Working Groups*: Static Var Compensator Protection (vice-chairman) e Application of Expert Systems to Power System Protection.



Edmund O. Schweitzer, III (M '74, SM '89, F '91) é Presidente da Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., localizada em Pullman, Washington, USA, uma empresa que desenvolve e fabrica relés microprocessados de proteção para sistemas elétricos de potência. Ele é também Professor Adjunto da Washington State University. Recebeu o seu BSEE da Purdue University em 1968 e o MSEE da Purdue University em 1971. Em 1977, ele recebeu o certificado de Ph.D. da Washington State University.

Ele é autor ou co-autor de mais de 30 *papers* técnicos. É membro da Eta Kappa Nu e Tau Beta Pi e faz parte de três grupos—*IEEE PES Power System Relaying Committee Working Groups*: Effectiveness of Distribution Protection, Line Protection with Digital Computers e Single Phase Tripping of Transmission Lines.



Mark W. Feltis (M '84) é um engenheiro de desenvolvimento de projetos de relés de proteção na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., (SEL) localizada em Pullman, Washington, USA. Ele recebeu o seu BSEE da Montana State University em 1984 e o MSEE da Washington State University em 1990, com bolsa de estudos da SEL. Ele trabalhou inicialmente para a Pacific Gas and Electric Company (Califórnia) na área de engenharia da distribuição. Ele é

membro da Tau Beta Pi e um engenheiro profissional registrado no estado da Califórnia.